Journal of Metallurgical and Materials Engineering, 35, 3. 2024. (17-34)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Metallurgical and Materials Engineering

https://jmme.um.ac.ir

Iron&Steel Society of Iran

Effects of Cooling Methods of Grinding on the Surface Characteristics and Microstructural Evaluations*

Research Article

Reza Rajabi[1], Masoud Pour[2], Hamid Sazegaran[3]

DOI: 10.22067/jmme.2024.86026.1137

1. Introduction

Improving the roughness and hardness of the work-piece surface for the technical and economic reasons, such as reducing the friction coefficient of the parts in contact with each other, acceptable wear resistance, increasing the life of the parts, higher manufacturing rate, and fabricating the parts with close tolerance and dimensional accuracy, is one of the main goals of most machining processes. Due to the fact that most metals and engineering alloys have a relatively good grinding ability, grinding is used as one of the main machining and polishing operations in the various industries.

Different machining behaviors have been reported for the case hardening by grinding with a cubic boron nitride wheel and a corundum wheel. In these studies, it has been pointed out that very low and very high feed rates, respectively, either cannot produce proper heat and raise the temperature of the work-piece above the temperature of austenite formation, or they do not give the structure the opportunity for proper thermal impact. Therefore, the best depth of hardness occurs at moderate feed rates. In this situation, increasing the depth of cut can help to increase the depth of hardness. When the depth of cut increases, the depth of the hardened will increase during grinding. Therefore, in a successful manufacturing process, it is necessary to choose a large depth of cut or to use the work-piece that has been quenched and tempered to increase the depth of the hard layer.

The purpose of this research is to determine the surface roughness and hardness as well as microstructural studies of M200 and CK45 steels with an innovative method by the authors of the article called indirect cooling in the grinding process (ICG). The surface roughness and surface hardness of the work-piece in two methods of indirect cooling and the minimum quantity of lubricant (MQL) have been measured and compared with the same grinding conditions and different cutting depths, and the effect of coolant temperature and depth of cut in both of steel is investigated.

2. Materials and Method

Due to the high friction and intense heat generation in the grinding process and considering thermal damage as one of the main limitations of the grinding process, the type of cooling fluid and its using method can play a significant role in controlling the heat and its effects. In Fig. 1, the heat flux entered into the work piece and the way of heat exit from it after passing through the stone wheel can be seen.

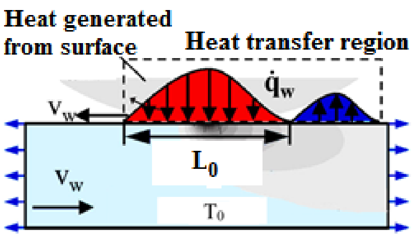


Fig. 1- Distribution of temperature during the grinding process.

Grinding was performed using a flat stone machine model FSQ-1640AD made in Hungary. Applying the depth load of the grinding wheel was selected by a micrometer with an accuracy of 0.001 mm. In addition, an aluminum oxide wheel fabricated by Nava company with a standard name of WA46K with a particle size of 46 microns with an external diameter of 250 mm, a width of 32 mm, a cutting speed of 35 m/s and a forward speed of 8 m/s was used. For cooling, a water cooler was used by making changes including height modification for the natural return of flow from the tank, strengthening the evaporator and injecting more gas in order to increase the cooling capability, as well as installing a water pump in the tank in order to send the coolant to the main tank. It should

*Manuscript received: December 23, 2023, Revised, January 28, 2024, Accepted, May 1, 2024.

[1] Maser's Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Advanced Technologies, Quchan University of Technology, Quchan, Iran.

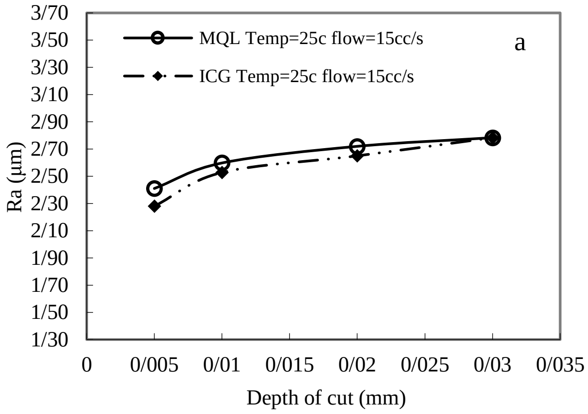
[2] Corresponding authors: Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering Science, Quchan University of Technology, Quchan, Iran.

[3] Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering Science, Quchan University of Technology, Quchan, Iran. **Email**: h.sazegaran@qiet.ac.ir

be kept in mind that the refrigerator tank was completely insulated and adiabatic conditions were provided.

3. Results and Discussion

In the proposed method of indirect cooling using a different cooling liquid compared to the common cooling liquids in grinding processes, at first the changes in roughness according to the depth of cut were investigated in the same machining conditions with two different cooling methods, and the results obtained are shown in Fig. 2. The results obtained for the surface roughness of M200 steel in the conditions of indirect cooling and cooling with the minimum quantity of coolant are between 2.28 to 2.75 microns and 2.41 to 2.76 microns, respectively. Meanwhile, the surface roughness of CK45 steel in the conditions of indirect cooling and cooling with the minimum amount of coolant is between 2.42 to 2.73 microns and 2.45 to 2.71 microns, respectively.



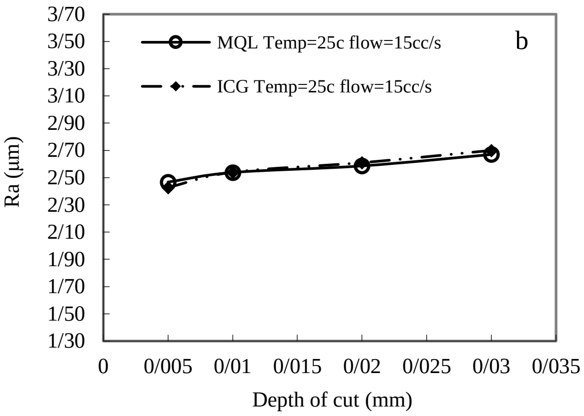
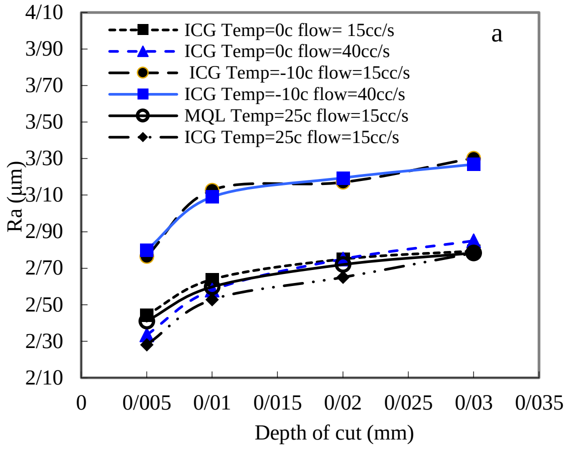


Fig. 2- The surface roughness vs. depth of cut and for a) M200 steel and b) CK45 steel.

In Fig. 4, the surface roughness changes vs. depth of cut with temperature and coolant flow rate are depicted. In M200 steel, changing the temperature from 25 to 0 °C does not cause significant changes in the surface roughness of the steel in both methods. While changing the coolant temperature from -10 ˚C has caused a significant increase in the surface roughness in the indirect cooling method compared to the minimum quantity of lubricant in different flow rates. In both flow rate 15 and 40 cc/s at -10 ˚C, there is a significant increase in the surface roughness and the surface of the work-piece has become more uneven. At the depth of cut of 0.005 mm at 0˚C and 25˚C, the surface roughness is at least 14% better than the surface roughness obtained at the temperature of -10˚C, and by increasing the depth of cut to 0.03mm, the surface roughness is improved 15%.



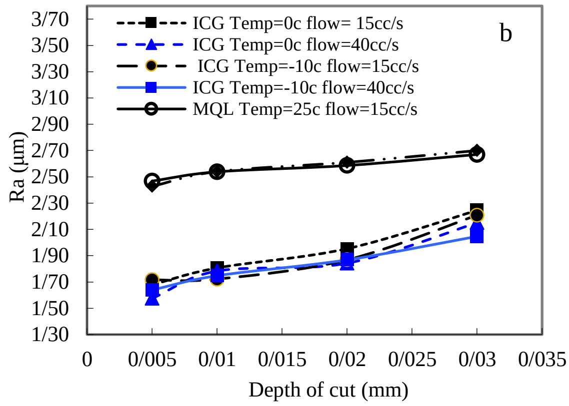


Fig. 3- The surface roughness vs. depth of cut for a) M200 steel and b) CK45 steel.

4- Conclusion

1- A decrease in surface roughness was observed in the indirect cooling method compared to the minimum amount of lubricant cooling method.

2- The effect of flow rate can be seen in the cooling conditions by indirect method in the high depth of cuts with the improvement of surface roughness.

3- In M200 steel, surface roughness has increased with increasing depth of cut in both methods.

4- The level of surface hardness in the indirect cooling method is different compared to the minimum quantity of lubricant method.

5- The microstructures of steels are completely different after grinding. In M200 steel, the microstructure includes upper bainite and lower bainite, while the microstructure of CK45 steel is ferritic-pearlitic.

مهندسی متالورژی و مواد
https://jmme.um.ac.ir/
انجمن آهن و فولاد ایران
دانشگاه فردوسی مشهد

اثرات روش‌های خنک‌کاری در فرآیند سنگ‌زنی تخت بر مشخصه‌های سطحی و ریزساختاری فولادهای M200 و CK45*

مقاله پژوهشی

رضا رجبی[۱] مسعود پور[۲] حمید سازگاران[۳]

DOI: 10.22067/jmme.2024.86026.1137

چکیده *در این پژوهش، به منظور کاهش تاثیرات مضر ناشی از افزایش حرارت در سطوح قطعات سنگ‌زنی شده، روش ابداعی جدیدی جهت روان‌کاری و خنک‌کاری فرآیند سنگ‌زنی تخت با عنوان روش خنک‌کاری غیرمستقیم ((ICG (Indirect cooling grinding) مطالعه شد. به منظور بررسی مزایای این شیوه، فولادهای M200 و CK45 با روش خنک‌کاری غیرمستقیم و روش حداقل میزان روان‌کار ((MQL(Minimum quantity lubrication) با دبی‌های متفاوت خنک‌کاری (۱۵ و cc/s ۴۰) در دماهای مختلف ۱۰-، ۰ و °C ۲۵) و با عمق‌های برش مختلف (۰/۰۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۲ و mm ۰/۰۳) سنگ‌زنی شدند. سایر پارامترهای سنگ‌زنی نظیر سرعت چرخ سنگ و سرعت حرکت طولی و عرضی میزکار در هر آزمایش ثابت در نظر گرفته شد. کمیت‌های اندازه‌گیری شده شامل زبری سطح، میزان سختی سطح (برحسب راکول C) و همچنین ارزیابی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی هستند. نتایج حاکی از آن است که در فولاد M200، استفاده از روش خنک‌کاری غیرمستقیم نسبت به روش حداقل میزان روان‌کار، منجر به افزایش زبری‌سطح در حدود ۳۱/۸۱ درصد و افزایش سختی سطحی در حدود ۲/۹۶ درصد و برای فولاد CK45، افزایش زبری‌سطح حدود ۳۱/۷ درصد و افزایش سختی سطحی حدود ۳/۱۱ درصد شده است. ریزساختار سطح فولادهای M200 و CK45 بعد از سنگ‌زنی به هر دو روش خنک‌کاری به ترتیب باینایت بالایی و پایینی و فریت-پرلیت است که بر روی میزان زبری و سختی سطح موثر هستند. علاوه بر این، روش ابداع شده به منظور خنک‌کاری برای فولاد CK45 مناسب‌تر است.*

واژه‌های کلیدی روش خنک‌کاری غیرمستقیم، حداقل میزان روان‌کار، فولادهای M200 و CK45، زبری سطح، سختی، ریزساختار.

Effects of Cooling Methods of Grinding on the Surface Characteristics and Microstructural Evaluations

Reza Rajabi Masoud Pour Hamid Sazegaran

Abstract *In this work, to reduce the harmful effects of the increasing the heat on the surfaces of the ground parts, a new innovative method for lubrication and cooling of the flat grinding process named indirect cooling method (ICG) was studied. To investigate the benefits of this method, M200 and CK45 steels with indirect cooling method and minimum quantity lubricant (MQL) with different cooling rates (15 and 40 cc/s) at different temperatures (-10, 0, and 25 °C) were ground with different cutting depths (0.005, 0.01, 0.02, and 0.03 mm). Other grinding parameters such as the speed of the wheel and the speed of the longitudinal and transverse movement of the workbench was considered constant in each test. The surface roughness, surface hardness (in terms of Rockwell C), and microstructural evaluations (using scanning electron microscopy) were examined. The results indicated that in M200 steel, the indirect cooling method compared to the minimum quantity lubricant, leading to an increase in surface roughness of about 31.81% and an increase in surface hardness of about 2.96%, and for CK45 steel, an increase in surface roughness of about 31.7% and an increase in surface hardness of about 3.11%. The microstructure of M200 and CK45 steels after grinding with both cooling methods is upper and lower bainite and ferrite-pearlite respectively, which are effective on the surface roughness and hardness. In addition, the indirect cooling method is more suitable for CK45 steel.*

Keywords Indirect cooling method, Minimum quantity lubrication, M200 and CK45 Steels, Surface Roughness, Hardness, Microstructure.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۱۰/۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۲/۱۲ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران.
(۲) نویسندهٔ مسئول، استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران.
(۳) استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده علوم مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران.
Email: h.sazegaran@qiet.ac.ir

مقدمه

بهبود میزان زبری و سختی سطح قطعه‌کار به دلایل فنی و اقتصادی نظیر کاهش ضریب اصطکاک قطعات در تماس با هم، مقاومت به سایش بیشتر، افزایش طول عمر قطعات، نرخ تولید بالاتر و ساخت قطعات با دقت ابعادی بیشتر، از اهداف اصلی اغلب فرآیندهای ماشین‌کاری است. با توجه به این که اغلب فلزات و آلیاژهای مهندسی قابلیت سنگ‌زنی نسبتا خوبی دارند، سنگ‌زنی به عنوان یکی از اصلی‌ترین عملیات ماشین‌کاری و پرداخت در صنایع گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرد [1]. سنگ‌زنی در فلزات و آلیاژها از زوایای متفاوتی اهمیت دارد و ارزیابی پارامترهای کلی همانند: سختی سطح، زبری سطح، دمای محل براده‌برداری، نیروی سنگ‌زنی، توپوگرافی چرخ‌سنگ، ارتعاشات چتر و سایش اغلب مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به دلیل اصطکاک به وجود آمده در منطقه برش بین قطعه‌کار و چرخ-سنگ، انرژی حرارتی نسبتا زیادی به وجود می‌آید که عدم کنترل این حرارت موجب باقی ماندن تنش‌های پسماند کششی، ایجاد ریزترک‌ها، سوختگی‌های موضعی، اکسیداسیون سطحی، بروز زبری نامطلوب سطح و آسیب‌های متنوع متالورژیکی در سطح خارجی قطعه می‌گردد که این مشکلات به دلیل ضعف در انتقال حرارت و خنک‌کاری در فرآیند سنگ‌زنی رخ می‌دهد که توسط مالکین (S. Malkin) و همکارش [2] ارزیابی شده‌اند.

در فولادهایی که قابلیت عملیات حرارتی دارند، می‌توان از حرارت تولید شده در طی فرآیند سنگ‌زنی برای انجام عملیات حرارتی مختلف همانند نیتراسیون کوتاه مدت در لایه سطحی قطعه کار استفاده نمود [3]. باید در نظر داشت که فرآیند خود خنک‌کننده تا حدی منجر به تبدیل فاز آستنیت به پرلیت لایه لایه می شود که به این پدیده، سخت شدن نا شی از سنگ‌زنی می‌گویند که سبب بهبود مقاومت در برابر سایش می‌شود [3,4]. هر چند در فولادهای AISI 4241 و AISI 1060 که بدین صورت سخت شده‌اند، تنش‌های فشاری پسماند و یک لایه سخت شده مارتنزیتی به عمق حداکثر ۲ میلیمتر گزارش شده ا ست [5]، اما شبیه‌سازی فولاد یاطاقان AISI 52100 [6] و فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304L [7] حاکی از آن ا ست که عمق تغییرات فازها در محدوده حداکثر ۱۰۰ میکرون ا ست. البته، باید توجه دا شت که عوامل بسیار زیادی در تغییر ضخامت لایه سخت شده می‌تواند موثر باشد. با توجه به آن که شبیه‌سازی‌ها دارای خطاهای نسبتا کمی در مقایسه با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی هستند، لذا نتایج توزیع دمایی آن‌ها تا حدود زیادی می‌تواند در تعیین فازهای ایجاد شده در قطعه کار مفید باشد.

رفتارهای ماشین‌کاری متفاوتی برای سخت شدن ناشی از سنگ‌زنی با چرخ نیترید بور مکعبی [8] و چرخ کراندوم [9] گزارش شده است. در این مطالعات اشاره شده است که نرخ‌های پیشروی خیلی کم و خیلی زیاد به ترتیب یا نمی‌توانند سبب تولید حرارت مناسب شوند و دمای قطعه‌کار را به بالای دمای تشکیل آستنیت ببرند و یا فرصت تاثیرگذاری حرارتی مناسب را به ساختار نمی‌دهند. بنابراین، بهترین میزان عمق نفوذ سختی در نرخ پیشروی‌های متوسط ایجاد می‌شود. در این شرایط، افزایش عمق برش می‌تواند به افزایش عمق نفوذ سختی کمک کند [10]. هنگامی که عمق برش افزایش می‌یابد، عمق لایه سخت شده در طی سنگ‌زنی زیاد خواهد شد. بنابراین در یک فرآیند تولید موفق، باید عمق برش زیادی را انتخاب کرد و یا از ساختار اصلی که کوئنچ و تمپر شده برای افزایش عمق لایه سخت استفاده نمود [5].

مطالعات فراوانی بر روی انتقال حرارت در حین فرآیند سنگ‌زنی صورت گرفته است و روش‌های تقویت و بهینه‌سازی عملیات سنگ‌زنی و همچنین شبیه‌سازی فرآیندهای سنگ‌زنی به صورت گسترده ارزیابی شده است [10-13]. ژانگ (S. Zhang) و همکاران [14] با انتشار مقالات هشت‌گانه تحت عنوان مکانیک کاربردی در سنگ‌زنی، با کمک گرفتن از تحلیل حرارتی ارائه شده توسط مدل مالکین، تنش پسماند و ساختار متالوژیکی قطعه-کار را در طی فرآیند سنگ‌زنی و همچنین تاثیر استفاده از مایع خنک‌کننده بر ریزساختار قطعه‌کار را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاکی از آن است که افزایش سرعت میز و سرعت چرخش چرخ‌سنگ (کاهش زمان تماس سنگ و قطعه‌کار) در فولاد سخت‌شونده، بر روی بهبود کیفیت سطحی تاثیر بسزایی دارد. علاوه بر این، تحقیقات شارما (C. Sharma) و همکاران [15] با مطالعه بر روی سه پارامتر عمق براده‌برداری، نرخ پیشروی و سرعت قطعه‌کار نشان می‌دهد که فرآیند سنگ‌زنی در اثر بارهای مکانیکی و حرارتی سبب ایجاد تغییرات مشخصی در ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی قطعه‌کار تولیدی (ریز یا درشت شدن ساختار دانه‌ها، ایجاد تنش‌های پسماند و بروز تغییرشکل پلاستیک) می-شود. البته، افزایش در مقدار پارامترهای فوق، منجر به تغییرشکل

پلاستیک شدیدتر و در نتیجه، سخت‌کاری سطحی بیشتری می‌گردد. مطالعه حامدی (Y. Hamedi) و همکارانش [16] در زمینه تغییرات سختی و تحولات ریزساختاری و چگونگی توزیع تنش‌های پسماند در قطعات سنگ‌زنی شده نشان داد که خسارات قابل توجهی از قبیل ایجاد تنش‌های پسماند، سوختگی سطحی و افزایش زبری سطح در دمای بالاتر از ۴۷۵ °C بر قطعه‌کار اعمال می‌گردد. نتایج تحقیقات اکزی (Z.H. Xie) و همکاران [17] در زمینه تاثیر نوع ریزساختار و اندازه دانه قطعه‌کار، بر میزان سخت‌کاری و تنش پسماند سطحی، نشان‌دهنده خنک شدن بسیار سریع محل برش و براده‌ها در طی فرآیند سنگ‌زنی است.

خنک‌کاری فوق سرد برای اولین بار در سال ۱۹۵۳ توسط دی‌اکسید کربن مایع در ماشین‌کاری مورد استفاده قرار گرفت. گسترش استفاده از خنک‌کاری فوق سرد در فرآیند سنگ‌زنی به سال ۱۹۸۵ توسط چاتوپادهی (A.B. Chattopadhyay) و همکارانش [18] بر می‌گردد، آن‌ها برای سنگ‌زنی چهار نوع فولاد با مقادیر سختی مختلف، از سه روش خنک‌کاری مختلف شامل جت نیتروژن مایع، محلول حاوی روغن و شرایط خشک استفاده و نتایج به دست آمده را با یکدیگر مقایسه کردند. از دیگر مزایای خنک‌کاری فوق سرد در سنگ‌زنی با توجه به کاهش قابل توجه دما، می‌توان به کاهش تنش‌های پسماند کششی، کاهش ترک‌های سطحی و همچنین بهبود زبری سطح اشاره کرد. مانیماران (G. Manimaran) و همکاران [19] به بررسی فشار جت نیتروژن مایع در سنگ‌زنی پرداختند. نتایج حاکی از آن است که افزایش فشار جت نیتروژن مایع باعث کاهش اصطکاک به دلیل کنترل بهتر دما و همچنین کاهش ریزش سنگ می‌گردد و در نتیجه، بهبود زبری سطح را در پی دارد. علاوه بر این، کاهش ۳۷ و ۱۳ درصدی نیروهای سنگ‌زنی در هنگام استفاده از نیتروژن مایع در مقایسه با شرایط خشک و تر و همچنین، بهبود ۵۹ و ۳۲ درصدی زبری سطح در مقایسه با شرایط گفته شده در سنگ‌زنی فولاد ضدزنگ 316 گزارش شده است [20]. افزایش عمق برش از یک میزان مشخص می‌تواند سبب افزایش سختی سطحی قطعه کار شود [21]. از طرف دیگر، مقایسه بر روی روش‌های خنک‌کاری در فولاد AISI 1045 نشان داد که در خنک‌کاری با روش غوطه‌وری، ساختار سطح تغییری نمی‌کند. اما، در زمان استفاده از نتیروژن مایع ساختار سطحی دارای تیغه‌های مارتنزیت خواهد شد و سختی این لایه نسبت به روش خنک‌سازی در هوا بسیار بیشتر خواهد بود. لازم به ذکر است که تنش‌های سطحی در روش خنک‌کاری با نیتروژن به صورت تنش فشاری است که می‌تواند از رشد ترک‌های سطحی نیز جلوگیری کند [22]. باید در نظر داشت که مدل‌های اصلاح شده مختلفی از مدل جانسون–مهل–اورامی (Johnson-Mehl-Avrami) برای تعیین تغییرات فاز در فولادها در فرآیند سنگزنی وجود دارد. به عنوان مثال، مدلی برای این موضوع بر اساس نرخ تغییرات دما، تنش و کرنش‌های پلاستیک ارائه شده است [6].

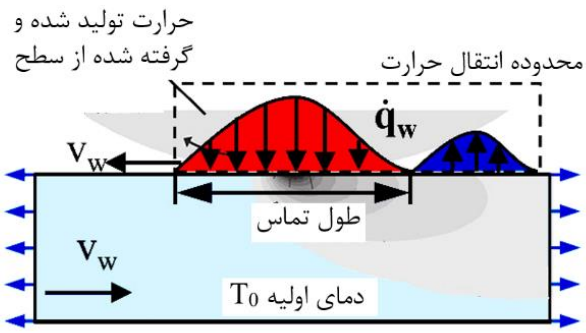
در پژوهش حاضر، جنبه‌های کلی سنگ‌زنی یعنی زبری سطح و سختی سطح مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به این که یکی از عوامل کاهش زبری سطح و افزایش سختی، خنک‌کاری مناسب قطعه‌کار در حین فرآیند سنگ‌زنی است، هدف اصلی تمرکز بر روی توسعه‌ی راه‌کارهای موثرتر این مقوله است. استفاده مستقیم از مایع خنک‌کننده در حین فرآیند سنگ‌زنی با چالش‌ها و مشکلات عملیاتی مختلفی همراه است. در این روش، مایع خنک‌کننده در سطح تماس بین چرخ سنگ و قطعه‌کار مشابه روش‌های متداول پاشیده نمی‌شود، بلکه مایع خنک‌کننده در تماس با سرتاسر قطعه‌کار به‌صورت غوطه‌وری، دمای آن را تا میزان دلخواه کاهش می‌دهد و بدین ترتیب مشکلاتی نظیر کنترل کاهش دما در روش‌هایی نظیر کاهش سریع دما با نیتروژن مایع حذف می‌شود و به عبارت دیگر، روش خنک‌کاری جدیدی در محدوده دمایی بین دمای محیط و نیتروژن مایع به عنوان خنک‌کننده معرفی شده است. هدف از این پژوهش، تعیین زبری و سختی سطح و همچنین مطالعات ریزساختاری فولادهای M200 و CK45 با روش ابداعی توسط نویسندگان مقاله به نام خنک‌کاری غیرمستقیم (ICG 9 Indirect cooling grinding) در فرآیند سنگ‌زنی است. زبری سطح و سختی سطح قطعه‌کار در دو روش خنک‌کاری غیرمستقیم و حداقل میزان روان‌کار ((MQL(Minimum quantity lubrication)) با شرایط یکسان سنگ‌زنی و عمق برش‌های متفاوت اندازه‌گیری و مقایسه شده است و تاثیر دمای مایع خنک‌کننده و عمق برش در هر دو نوع فولاد مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مواد و روش آزمایش

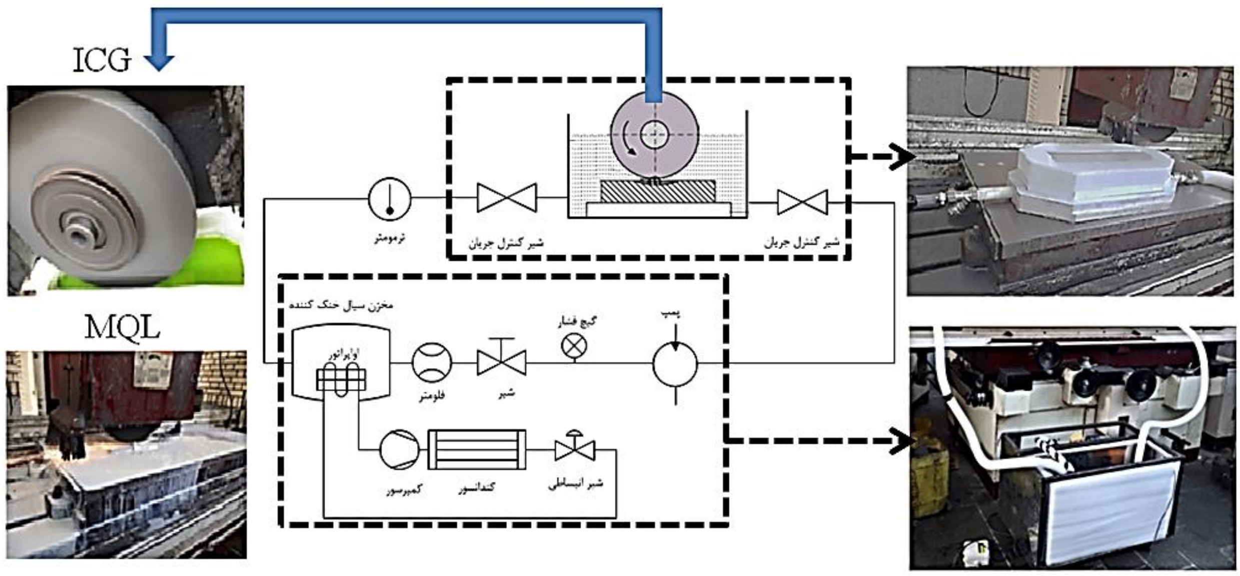
مواد و سنگ‌زنی

به علت اصطکاک بالا و تولید حرارت شدید در فرآیند سنگ‌زنی و با در نظر گرفتن آسیب‌های گرمایی به عنوان یکی از محدودیت‌های اصلی فرآیند سنگ‌زنی، نوع سیال خنک‌کننده و

شیوه استفاده از آن می‌تواند نقش بسزایی در کنترل حرارت و تاثیرات ناشی از آن ایفا نماید. در شکل (۱)، شار حرارتی وارد شده به قطعه‌کار و نحوه خروج حرارت از آن پس از عبور چرخ سنگ مشاهده می‌شود. در خنک‌کاری غیرمستقیم سعی می‌شود که از شار حرارتی ورودی به قطعه‌کار کاسته شود و شار خروجی از قطعه کار به دلیل غوطه‌وری قطعه‌کار در مایع خنک‌کننده افزایش یابد. دلایلی که استفاده از روش خنک‌کاری غیرمستقیم را توجیه می‌کنند شامل تنش‌زدایی (تنش‌های ناشی از عملیات سنگ‌زنی و سایر فرآیندهای تولید صورت گرفته بر روی قطعه کار)، ریز کردن ساختار دانه‌بندی، بهبود کیفیت سطح نهایی، افزایش مقاومت به سایش با ایجاد لایه سخت شده بر روی سطح، افزایش مقاومت به ضربه با باقی ماندن مرکز نرم در داخل قطعه، بهبود ویژگی‌ها الکتریکی و مغناطیسی و بهبود میزان براده‌برداری هستند. فرآیند سنگ‌زنی در روش خنک‌کاری غیرمستقیم شامل دو مرحله است که عبارتند از: الف) لحظه آغاز براده‌برداری که دمای منطقه براده‌برداری به حدود ۹۰۰ تا ۱۰۰۰°C (شایان توجه است که محدوده دمای آستنیته فولاد CK45 بین ۸۰۰ تا ۸۴۵ °C و فولاد M200 بین ۸۴۰ تا ۸۶۰ °C است.) می‌رسد و ب) همزمان با براده برداری که در طی فرآیند غوطه‌وری قطعه کار درون مایع خنک‌کننده با دمای۱۰، ۰ و ۱۰- °C و سرد شدن تمام نقاط قطعه‌کار که سرعت فرآیند خنک‌شدن افزایش می‌یابد. لذا این احتمال وجود دارد که با این روش، به دلیل همگن و ریز شدن دانه‌ها، مشخصه‌های سطح قطعه‌کار بهبود یابد. البته این مسئله نیز وجود دارد که با سرد شدن ناگهانی منطقه برش یافته، احتمال تشکیل فاز مارتنزیت و افزایش میزان سختی سطح نمونه‌ها وجود دارد. در شکل (۲) طرح‌واره سیستم خنک‌کاری توسط مایع خنک‌کننده به تصویر کشیده شده است.



شکل ۱ توزیع دما در زمان انجام فرآیند سنگ‌زنی (که vw اختلاف سرعت بین چرخ‌سنگ و قطعه کار و $\dot{q}_w$ شار حرارتی است)



شکل ۲ طرح‌واره سیستم خنک‌کاری غیرمستقیم توسط مایع خنک‌کننده در مقایسه با روش حداقل میزان روان‌کار.

عملیات سنگ‌زنی به‌وسیله یک دستگاه سنگ تخت مدل FSQ-1640AD محصول کشور مجارستان انجام گرفت. اعمال بار عمقی چرخ‌سنگ توسط میکرومتر با دقت ۰/۰۰۱ میلیمتر انتخاب شد. دستگاه سنگ‌زنی مورد استفاده در شکل (۲) به تصویر کشیده شده است. در آزمایش‌های سنگ‌زنی از چرخ اکسیدآلومینیم تولید شده توسط شرکت ناوا با نام استاندارد WA46K با سایز ذرات ۴۶ میکرون و میزان سختی چسب K و با قطر خارجی ۲۵۰ mm، عرض ۳۲ mm، سرعت برشی m/s ۳۵ و سرعت پیشروی m/s ۸ استفاده شد. در این آزمایشات جهت ایجاد سرمایش به کمک سیکل تبرید تراکمی از یک آبسردکن با ایجاد تغییراتی شامل اصلاح ارتفاع جهت برگشت طبیعی جریان از مخزن، تقویت اواپراتور و تزریق بیشتر گاز به منظور افزایش قابلیت خنک‌کاری و همچنین، نصب پمپ آب در مخزن به منظور ارسال مایع خنک‌کننده به مخزن اصلی استفاده گردید. باید در نظر داشت که دور تا دور مخزن یخچال کاملا عایق شد و شرایط آدیاباتیک فراهم گردید.

مایع خنک‌کننده مورد استفاده در این آزمایشات، مایع کلیسم منیزیم استات (با مشخصات ارائه شده در جدول ۱) و آب مقطر سازگار با محیط زیست با نسبت ۵۰ درصد و به میزان ۸ لیتر است که مقاومت در مقابل یخزدگی تا دمای ۴۰- °C را دارد [23]. شایان ذکر است که این ماده شیمیایی مشکلات زیست محیطی مایعات خنک‌کننده رایج را ندارد و به کارگیری آن برای اپراتور دستگاه نیز خطری را ایجاد نمی‌کند. به منظور صرفه‌جویی در مصرف مایع خنک‌کننده ابداعی، مخزن مخصوصی از پی‌وی‌سی با ابعاد ۲۰۰ mm × ۵۰۰ mm × ۸۰ mm طراحی و ساخته شد. در این مخزن با تنظیم شیرهای ورودی و خروجی، دبی مایع خنک‌کننده در حدود ۴۰ cc/s قابل تنظیم است. علاوه بر این، کنترل دبی با اندازه‌گیری به وسیله فلوتر جریان و شیر کنترل جریان انجام شد. در طی آزمایشات، غوطه‌وری کامل قطعه‌کار درون مایع خنک‌کننده صورت گرفت و خنک شدن کل قطعه‌کار، امکان‌پذیر است.

مخزن به دلیل استفاده از جنس پی‌وی‌سی کاملا عایق حرارت است و توسط ۳۲ آهنربای مخصوص تعبیه شده بر روی آن، توسط نیروی مغناطیس دستگاه سنگ‌زنی ثابت نگه داشته می‌شود. این در حالی است که دو عدد حسگر دما با حساسیت بالا به منظور اندازه‌گیری دماهای ورودی و خروجی بر روی آن نصب شد. در انتهای قاب دستگاه، برای جمع‌آوری براده‌های حاصل از سنگ‌زنی از صافی آهنربایی استفاده گردید. شلنگ‌های ورودی و خروجی از جنس مخصوص و دارای انعطاف‌پذیری بالا هستند که در دماهای پایین کاملا عایق‌اند و تا دمای ۲۰- °C را تحمل می‌کند. آزمایشات سنگ‌زنی بر روی دو نوع فولاد مختلف از نوع M200و CK45 با ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ارائه شده به ترتیب در جداول (۲) و (۳) انجام شد. به منظور جلوگیری از اثرات فرآیندهای آماده‌سازی بر روی میزان زبری و سختی سطح، تمامی قطعات با استفاده از دستگاه وایر-کات (سوئیسی از نوع AGIE) به صورت تکه‌هایی با ابعاد mm ۱۵ × ۱۵ mm × ۱۵ mm بریده شدند. برای انجام هر آزمایش از ۸ نمونه استفاده شد. دبی مایع خنک‌کننده در همه آزمایشات توسط فلومتر اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است که برای مقایسه از روش سنگ‌زنی رایج یا همان روش حداقل میزان روان‌کار نیز استفاده گردید که در آن، خنک‌کننده روغن حل‌شونده آمینوجی BC100 شرکت بهبود شیمی سپاهان به کار گرفته شد.

جدول ۱ مشخصات کلسیم منیزیم استات استفاده شده به عنوان خنک‌کننده

چگالی (g/cm^3)	مواد نامحلول در آب (درصد وزنی)	کلسیم منیزیم استات (درصد وزنی)	کلسیم هیدروکسید (درصد وزنی)	PH در محلول
۱/۴	۱	۹۹	۰/۲	۹/۲

جدول ۲ ترکیب شیمیایی فولادهای مورد استفاده بر حسب درصد وزنی

نوع فولاد	کربن	سیلیسیم	منگنز	فسفر	گوگرد	کروم	مولیبدن
M200	۰/۴۲	۰/۴۵	۱/۶	۰/۰۳۵	۰/۰۰۵	۱/۹۸	۰/۲۳
CK45	۰/۵۰	۰/۴	۰/۸	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۴	۰/۱

جدول ۳ ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی فولادهای مورد استفاده

نوع فولاد	سختی (HB)	استحکام تسلیم (Mpa)	استحکام کششی (Mpa)	ضریب هدایت حرارتی (W/mK)	چگالی (g/cm^3)
M200	۲۳۰	۴۵۰	۶۸۰	۳۵,۶	۷/۸۵
CK45	۱۶۳	۴۱۰	۶۲۶	۱۵,۱	۷/۷۷

جدول ۴ مشخصات سنگ‌زنی انجام شده بر روی فولادها به هر دو روش خنک‌کاری

دبی سیال خنک‌کننده (cc/s)	دمای مایع خنک کننده(°C)		عمق برش (mm)	تعداد پاس	عمق نهایی برش (mm)	سرعت برشی (m/min)
	ICG	MQL				
۱۵ و ۴۰	−۱۰		۰/۰۰۵	۳۰	۰/۱۵	۰/۰۵
	−۱۰		۰/۰۱	۱۵		
	−۱۰		۰/۰۲	۷		
	−۱۰		۰/۰۳	۵		
	۰		۰/۰۰۵	۳۰		
	۰		۰/۰۱	۱۵		
	۰		۰/۰۲	۷		
	۰		۰/۰۳	۵		
۱۵		۲۵	۰/۰۰۵	۳۰	۰/۱۵	۰/۰۵
		۲۵	۰/۰۱	۱۵		
		۲۵	۰/۰۲	۷		
		۲۵	۰/۰۳	۵		
	۲۵		۰/۰۰۵	۳۰		
	۲۵		۰/۰۱	۱۵		
	۲۵		۰/۰۲	۷		
	۲۵		۰/۰۳			

تعیین زبری و سختی سطح

مطالعات پیشین بر روی رفتار سایشی فولادها نشان می‌دهد که مقاومت به سایش ارتباط مستقیمی با زبری و میزان سختی سطح دارد [17]. برای هر یک از فولادها یک محدوده دمای آستنیته شدن به منظور انجام عملیات سخت کردن وجود دارد که اغلب به دمای سخت کردن شهرت دارد. دمای سخت کردن فولادهای M200 و CK45 بر طبق دیاگرام تعادلی آهن و کربن، در حدود ۸۰۰ تا ۱۴۰۰ °C است. این محدوده دمایی به گونه‌ای مشخص می‌شود که فولاد پس از سریع سرد شدن، در ضمن داشتن ساختاری با دانه‌های ریز، حداکثر مقدار سختی را داشته باشد. زمان نگه‌داری در دمای سخت کردن بستگی به نوع و درصد کاربیدهایی دارد که در فاز آستنیت حل می‌شوند. این زمان به گونه‌ای باید باشد که ساختار لایه لایه پرلیت و فاز باینایت تشکیل نشوند و کاربیدها به اندازه کافی درون زمینه حل شوند و در نتیجه، سختی مطلوب به دست آید. اغلب زمان نگهداری در دمای سخت‌کردن بین ۵ تا ۱۵ min است که در فرآیند سنگ‌زنی این زمان اغلب قابل کنترل نیست و به‌جای آن معمولا از کاهش سریع دمای سطح قطعه‌کار استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی المان محدود نشان می‌دهد که در زمان سنگ‌زنی قطعه کار از جنس فولاد CK45 با عمق برش ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ mm دما به حدود ۱۲۰۰°C خواهد رسید و سرعت سرد کردن کمتر از ۱۰ ثانیه می‌تواند سبب ایجاد ساختار مارتنزیتی در سطح قطعه کار

شود [24]. در این پژوهش، انتظار می‌رود که ساختار پرلیت ریز یا فاز مارتنزیت در هر دو نوع فولاد تشکیل شود و در نتیجه، میزان سختی سطح افزایش یابد. تشکیل فاز مارتنزیت موقعی امکان‌پذیر است که از دگرگونی آستنیت به مخلوط فریت و سمانتیت (تشکیل لایه‌های متناوب پرلیت در اثر دگرگونی یوتکتوئید) جلوگیری شود. بررسی رفتار سطح در عملیات سنگ‌زنی یک فولاد مستلزم آزمایشات مکرر برای دست‌یابی به مشخصات سطحی ایجاد شده است. برای بررسی اثر روش به کارگیری مایع خنک‌کننده بر روی زبری سطح تولید شده بعد از سنگ‌زنی، ابتدا زبری سطحی هر دو فولاد در فرآیند سنگ‌زنی در دما و دبی یکسان مایع خنک‌کننده (به ترتیب ۲۵ °C و ۱۵ cc/s) با دو روش MQL و ICG اندازه‌گیری شد. سپس، به بررسی اثر عمق برش در هر دو فولاد M200 و CK45 در دبی‌ها و دماهای مختلف مایع خنک‌کننده (به ترتیب ۱۵ و ۴۰ cc/s و دماهای ۱۰-، ۰ و ۲۵ °C) بر روی میزان زبری سطح، سختی و همچنین فازهای تشکیل شده در سطح فولادهای مورد آزمایش انجام شد که در جدول (۴) پارامترهای اعمال شده در انجام آزمایشات ارائه شده است. اندازه‌گیری زبری سطح بر روی نمونه‌های فولادی سنگ‌زنی شده با استفاده از دستگاه Taylor Hobson Surtonic 25انجام شد. قابل ذکر است که پس از انجام عملیات سنگ‌زنی و آماده‌سازی نمونه‌ها، آزمایش سختی توسط دستگاه سختی‌سنج یونیورسال Koopaco UV1 انجام شد. برای اندازه‌گیری سختی، مقدار میانگین سختی اندازه‌گیری شده در سه ناحیه مختلف از سطح سنگ‌زنی شده به عنوان معیار و سختی برحسب سختی راکول C مورد آزمایش قرار گرفت. اندازه‌گیری تحت نیروی ۱۵۰ کیلوگرم و در مدت زمان ۴ ثانیه انجام شد.

ارزیابی‌های ریزساختاری

برای مطالعه تغییرات ریزساختاری در سطوح قطعات فولادی سنگ‌زنی شده از ارزیابی‌های میکروسکوپ نوری (OM) و میکرو سکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. نمونه‌ها ابتدا توسط دستگاه وایر کات برش داده شدند و سپس، فرآیندهای مانت گرم، سمباده‌زنی و پولیش‌کاری بر روی آن‌ها انجام شد. به منظور آشکارسازی ریزساختار، فرآیند حکاکی توسط محلول نایتال ۲ درصد و به مدت ۱۰ ثانیه صورت گرفت. به منظور بهبود تصویربرداری، نمونه‌های میکرو سکوپ الکترونی روبشی توسط آلیاژ Au-Pd و با دستگاه Sputter Coater SC7620 پوشش‌دهی شدند و سپس، مطالعات میکرو سکوپ الکترونی روبشی توسط دستگاه LEO 1450VP انجام شد.

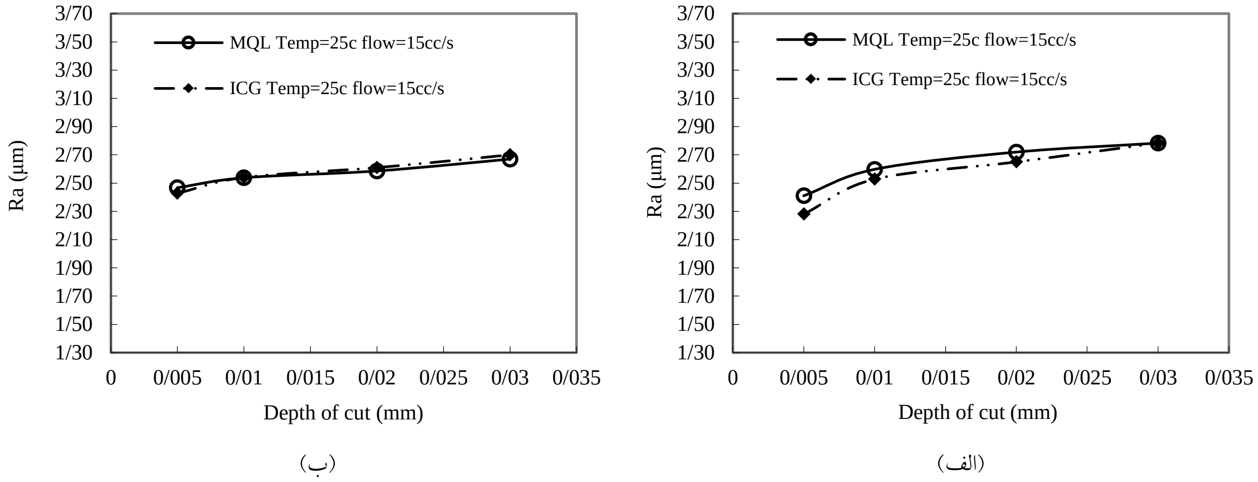
نتایج و بحث

زبری سطح

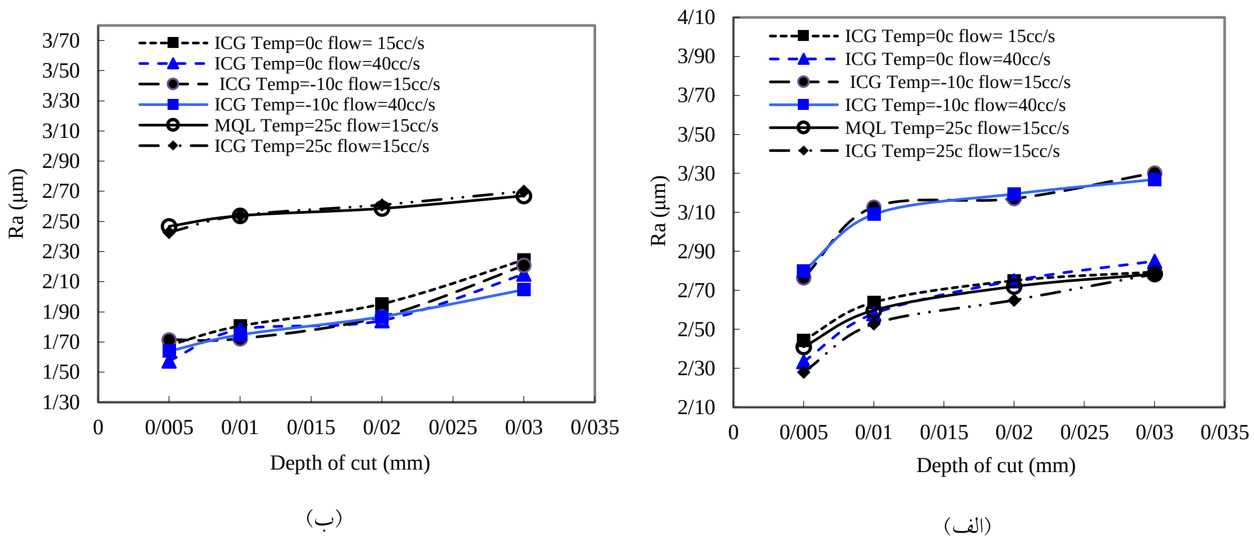
در روش پیشنهادی خنک‌کاری غیرمستقیم با استفاده از مایع خنک‌کننده متفاوت نسبت به مایعات خنک‌کننده متداول در فرآیندهای سنگ‌زنی، در ابتدا به بررسی تغییرات زبری برحسب عمق برش در شرایط یکسان ماشین‌کاری با دو مایع خنک‌کننده متفاوت پرداخته شد که نتایج به دست آمده در شکل (۳) نشان داده شده است. نتایج به دست آمده برای زبری سطح فولاد M200 در شرایط خنک‌کاری غیرمستقیم و خنک‌کاری با حداقل میزان مایع خنک‌کننده به ترتیب بین ۲/۲۸ تا ۲/۷۵ میکرون و ۲/۴۱ تا ۲/۷۶ میکرون است. این در حالی است که میزان زبری سطح فولاد CK45 در شرایط خنک‌کاری غیرمستقیم و خنک‌کاری با حداقل میزان مایع خنک‌کننده به ترتیب بین ۲/۴۲ تا ۲/۷۳ میکرون و ۲/۴۵ تا ۲/۷۱ میکرون است. همان طور که مشاهده می‌شود، تغییر نوع روش استفاده از مایع خنک‌کننده تغییرات محسوسی در زبری سطح در عمق برش‌های مختلف ایجاد نکرده است.

در شکل (۴)، تغییرات زبری‌سطح به ازای عمق برش با تغییر دما و دبی مایع خنک‌کننده به تصویر کشیده شده است. همان طور که در شکل (۴-الف) مشاهده می‌شود، در فولاد M200 تغییر دما از ۲۵ به ۰ °C تغییرات قابل توجهی در زبری سطح فولاد در هر دو روش خنک‌کاری غیرمستقیم و حداقل میزان روان‌کار ایجاد نمی‌کند. در حالی که تغییر دمای مایع خنک‌کننده از به ۱۰- °C سبب افزایش قابل ملاحظه‌ای در زبری سطح در روش خنک‌کاری غیرمستقیم در مقایسه با حداقل میزان روان‌کار در دبی‌های مختلف شده است. همان طور که مشاهده می‌شود در هر دو دبی ۱۵ و ۴۰ cc/s در دمای ۱۰- °C افزایش چشمگیری

در زبری سطح ایجاد شده است و سطح قطعه کار ناهموارتر شده است. در عمق برش ۰/۰۰۵ mm در دماهای ۰ °C و ۲۵ °C زبری سطح حداقل ۱۴ درصد بهتر از زبری سطح به دست آمده در دمای ۱۰- °C است و با افزایش عمق برش به ۰/۰۳ mm بهبود به میزان ۱۵درصد رخ می‌دهد. بدین ترتیب مشاهده می‌شود برای این فولاد کاهش دما می‌تواند اثر نامطلوبی بر روی میزان زبری سطح آن ایجاد کند. با بررسی شکل (۵-الف) در فولاد M200 و بررسی تاثیر عمق براده‌برداری مشاهده می‌شود که با افزایش عمق برش از ۰/۰۰۵ به ۰/۰۱ mm، تغییرات محسوس‌تری در زبری سطح نسبت به افزایش عمق از ۰/۰۱ تا ۰/۰۳ mm در نمونه‌های سنگ‌زنی شده در هر دو دبی و در تمامی دماها ایجاد شده است. از طرف دیگر، بررسی شکل (۵-الف) در عمق برش ۰/۰۰۵ mm نشان می‌دهد که در دبی یکسان ۱۵ cc/s، کاهش دما از ۲۵ به ۰°C نیز سبب افزایش زبری سطح شده است. این روند در تمامی عمق برش‌های بعدی نیز مشاهده می شود. لذا می‌توان مجدا نتیجه گرفت کاهش دما می‌تواند سبب تغییر در زبری سطح قطعه شود.



شکل ۳ مقایسه تغییرات زبری سطح برحسب عمق برش و با تغییر شیوه خنک‌کاری برای (الف) فولاد M200 و (ب) فولاد CK45



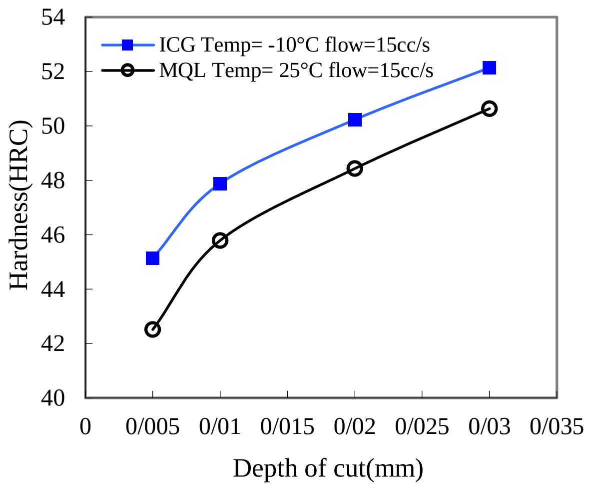
شکل ۴ مقایسه تغییرات زبری سطح برحسب عمق برش با تغییر دما و دبی مایع خنک‌کننده برای (الف) در فولاد M200 و (ب) فولاد CK45.

از طرف دیگر، تغییرات میزان عمق براده‌برداری منجر به افزایش زبری در سطح نمونه‌ها می‌شود. این در حالی است که حداکثر تغییرات زبری در دمای C° ۱۰- و دبی cc/s ۴۰ به میزان تقریبی ۱۵ درصد نسبت به کلیه دماهای ۰ و ۲۵°C است. افزایش چشمگیر زبری سطح در این شرایط ماشین‌کاری این موضوع را برجسته می‌نماید که افزایش دبی و کاهش دما به ۱۰°C- می‌تواند سبب ایجاد فازهای سخت در سطح فولاد مورد مطالعه گردد. در فولاد CK45، تغییر دما از ۲۵ به C° ۰ در عمق برش mm ۰/۰۰۵ حدود ۳۲ درصد است که به تدریج با افزایش عمق برش به mm ۰/۰۳ به ۲۲ درصد می‌رسد. نکته قابل توجه آن است که در فولاد CK45 با افزایش عمق برش، اثر کاهش دما و دبی مایع خنک‌کننده بهبود ایجاد شده کمتری در زبری سطح ایجاد می‌کنند. بررسی نتایج حاصله از زبری‌سنجی نشان می‌دهد که تاثیر اختلاف دما از ۲۵ تا C° ۱۰- کاملا محسوس است.

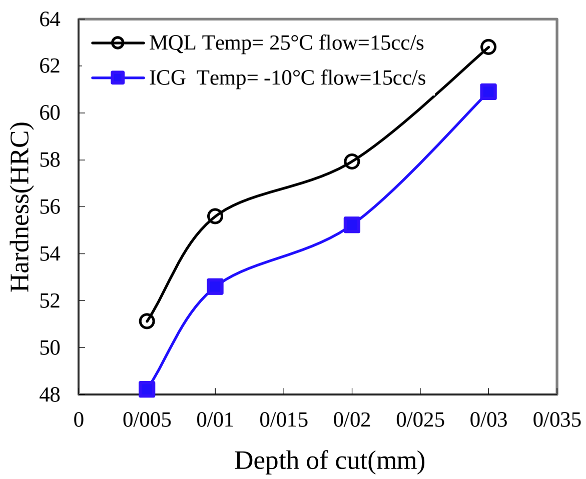
سختی سطحی

هر دو روش خنک‌کاری غیرمستقیم و حداقل میزان روان‌کار در دو فولاد مورد بررسی، بر روی میزان سختی سطح تاثیرگذار هستند. اثرات عمق برش بر روی میزان سختی نمونه‌های سنگ‌زنی شده در دبی ثابت cc/s ۱۵ و دماهای ۱۰- و C° ۲۵ در شکل (۵) نشان داده شده است. دلیل انتخاب این دبی از شرایط ماشین‌کاری مقاله این است که در بخش قبل نشان داده شده است که تغییر زبری‌سطح ناشی از تغییر دبی بسیار ناچیز است در حالی که کاهش دما تاثیر محسوسی در تغییر زبری سطح دارد. از آنجایی که این امکان وجود دارد که تغییر زبری سطح به دلیل تغییر فازهای ساختاری فولادها ایجاد شده باشد، لذا این شرایط ماشین‌کاری که اختلاف برجسته‌ای در زبری سطح ایجاد کرده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

بررسی روند تغییرات سختی در هر دو دمای ۱۰- و C° ۲۵ حاکی از افزایش سختی سطح، در زمان افزایش عمق برش می‌باشد. از طرف دیگر، نتایج حاکی از آن هستند که کاهش دما در هر دو فولاد سبب تغییر در سختی سطحی می‌گردد. اختلاف بین سختی سطحی ایجاد شده بین دو روش تقریبا در تمامی عمق برش‌ها ثابت است و به ترتیب در فولاد CK45 و M200 به میزان ۳/۱ درصد کاهش سختی و ۲/۹ درصد افزایش سختی مشاهده شده است. از مقایسه داده‌های سختی‌سنج برای هر دو روش سنگ‌زنی خنک‌کاری غیرمستقیم و حداقل میزان روان‌کار می‌توان دریافت که شیوه خنک‌کاری غیرمستقیم می‌تواند سختی سطحی فولاد CK45 را کاهش دهد درحالی که در فولاد M200 سختی به میزان تقریبا ۳ درصد افزایش یافته است. این نتایج به صورت مشابه در مرجع [25] نیز قابل مشاهده است. همان طور که مشاهده می‌شود تغییرات ایجاد شده به ازای کاهش دمای برابر با C° ۳۵ ایجاد شده است. در بخش بعد، برای بررسی دلیل تغییرات سختی متفاوت در شرایط ثابت ماشین‌کاری در دو فولاد CK45 و M200 به بررسی ریزساختار دو فولاد در حالت‌های ماشین‌کاری مختلف پرداخته شده است.



(الف)



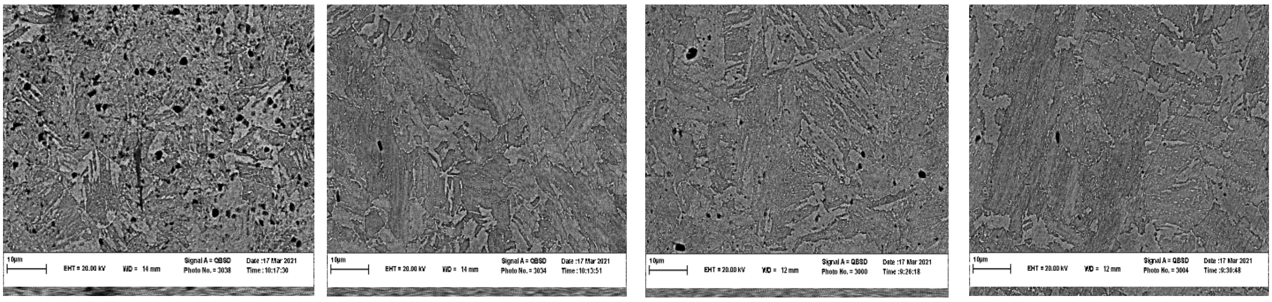
(ب)

شکل ۵ مقایسه تغییرات سختی سطح برحسب عمق برش با تغییر میزان دبی و دمای مایع خنک‌کننده برای (الف) در فولاد M200 و (ب) فولاد CK45

ارزیابی ریزساختاری

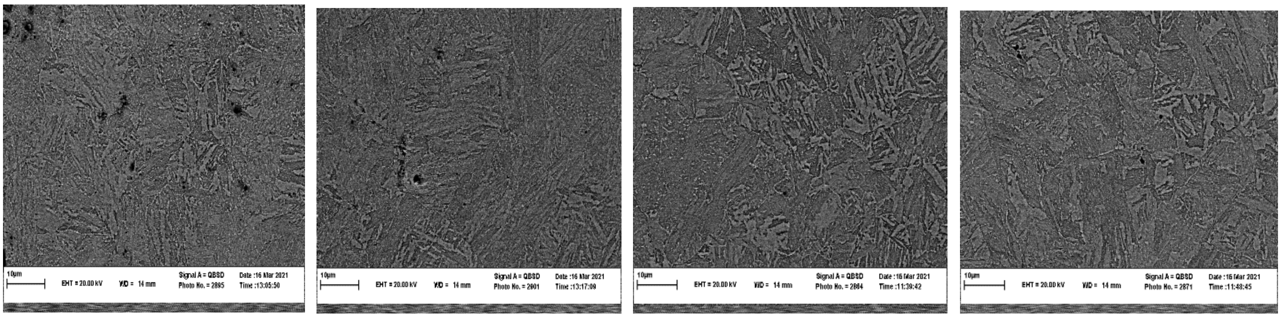
به دلیل کوتاه بودن زمان حرارت‌دهی (حرارت ایجاد شده در طی فرآیند سنگ‌زنی قطعه کار) و قرار گرفتن در مجاورت سیال خنک‌کننده، فولاد به سرعت سرد می‌شود. بدین ترتیب زمان خنک‌سازی قطعه بسیار کوتاه است و این عامل بر روی فازهای حاصل از دگرگونی آستنیت موثر است. یکی از دلایلی که می‌تواند به عنوان عامل تاثیرگذار در تغییر زبری و سختی سطح مطرح گردد، ایجاد فازهای گوناگون در اثر خنک‌کاری فولاد با مایع خنک‌کننده است. همان طور که قبلا نشان داده شده است، سرعت سرد کردن فولاد می‌تواند بر روی فازهای موجود در زیرساختار آن تاثیرگذار باشد [19]. از طرف دیگر، با توجه به توزیع دمای ایجاد شده در فولاد و عملیات خنک‌کاری سطح، تغییر فازهای فولاد در عمق‌های مختلف نسبت به سطح به وجود می‌آید و علاوه بر این، توزیع دما می‌تواند تا عمق تقریبی ۱ mm سبب تغییر ساختار فولاد گردد [20].

قبلا نشان داده شده است که مشخصه‌های سطحی و ریزساختار قطعات فولادی سنگ‌زنی شده شدیدا تحت تاثیر شیوه خنک‌کاری است [26]. به منظور بررسی بیشتر و دقیق‌تر اثر ریزساختار بر روی میزان زبری و سختی در سطوح سنگ‌زنی شده، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی ۵۰۰۰ از سطوح سنگ‌زنی شده به دو روش خنک‌کاری تهیه شد و با استفاده از روش پردازش تصویر مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. به منظور ارزیابی تغییرات فازها، علاوه بر تصویربرداری از عمق ۱۰ μm، تصاویری از مرکز قطعات نیز ارائه شده است. این تصاویر در اشکال (۶-الف تا د) برای فولاد M200 و در اشکال (۷-الف تا د) برای فولاد CK45 ارائه شده‌اند. نمونه‌های اولیه فولادهای M200 و CK45 قبل از سنگ‌زنی بر اساس نمودار تعادلی آهن-کربن، دارای ریزساختار فریتی- پرلیتی هستند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌های فولاد M200 سنگ-زنی شده به دو روش حداقل میزان روان‌کار و خنک‌کاری غیرمستقیم و مقایسه آن‌ها در روش‌های سنگ‌زنی با پارامترهای مشخص نشان می‌دهد که تغییرات قابل توجهی در ریزساختار سطح نهایی قطعات به وجود آمده است. تصاویر نشان‌دهنده گونه‌های مختلف باینایت در نمونه‌های سنگ‌زنی شده به هر دو روش حداقل میزان روان‌کار و خنک‌کاری غیرمستقیم هستند.



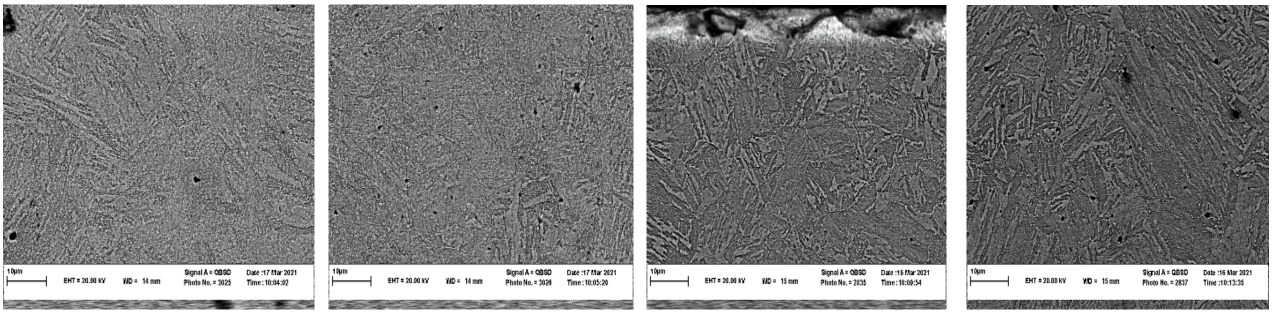
MQL مرکز — MQL لب — ICG مرکز — ICG لبه

(الف)



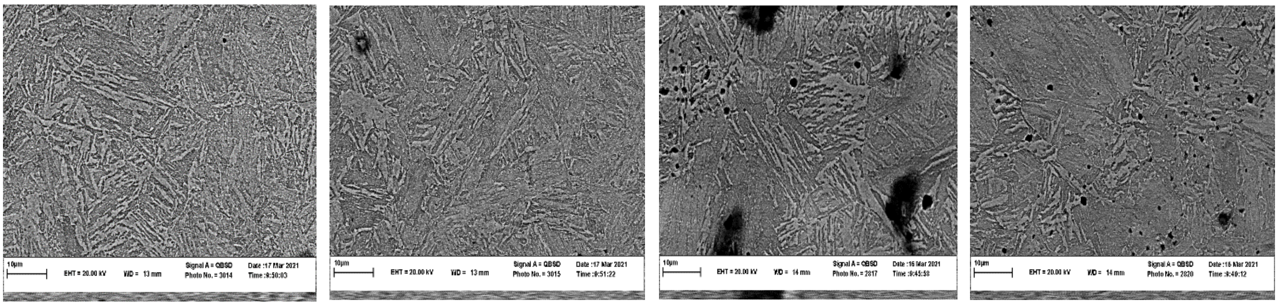
MQL مرکز — MQL لبه — ICG مرک — ICG لبه

(ب)



MQL مرکز　　MQL لبه　　ICG مرکز　　ICG لبه

(ج)



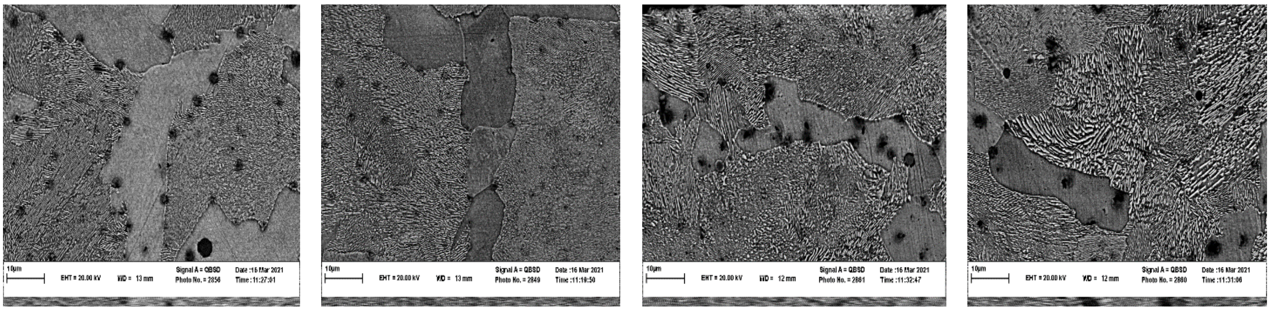
MQL مرکز　　MQL لبه　　ICG مرکز　　ICG لبه

(د)

شکل ۶ (الف) عمق برش ۰/۰۳ mm، (ب) عمق برش ۰/۰۲ mm، (ج) عمق برش ۰/۰۱ mm، (د) عمق برش ۰/۰۰۵ mm

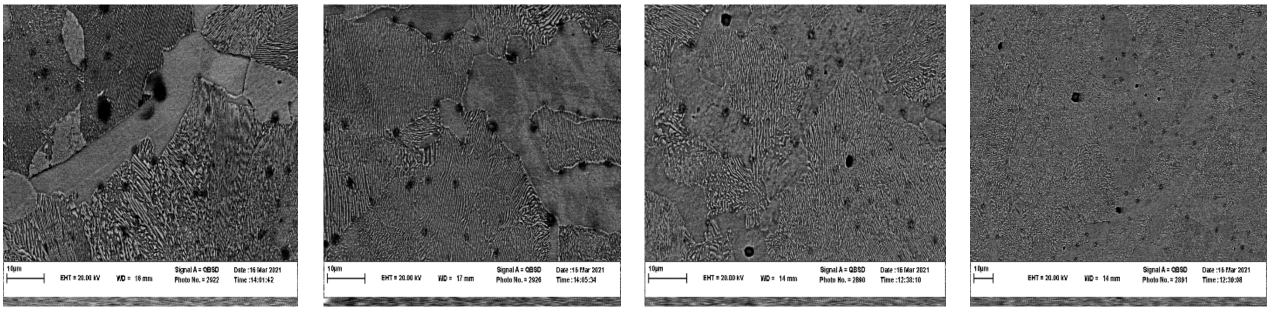
قابل ذکر است که نتایج ریزساختاری به دست آمده منطبق با نتایج زبری و سختی سطح هستند. با تشکیل گونه‌های مختلف باینایت، میزان زبری سطح و مقدار سختی افزایش می‌یابد و افزایش مقادیر این فاز سبب افزایش سختی و زبری سطح خواهد شد. فاز باینایت در اثر دگرگونی آستنیت در دمایی بالاتر از دمای تشکیل مارتنزیت تشکیل می‌شود. البته، باید دمای دگرگونی از دمای تشکیل پرلیت پایین‌تر باشد. در حالت کلی، باینایت به دو نوع بالایی و پایینی دسته‌بندی می‌شود که تشکیل هر کدام از آن‌ها وابسته به دما، سرعت سرد شدن و عناصر آلیاژی است. هر دو نوع باینایت بالایی (یا باینایت پردار که در دماهای بالاتر تشکیل می‌شود) و باینایت پایینی (که در دماهای پایین‌تر تشکیل می‌شود)، توده‌هایی از صفحات فریت هستند که توسط آستنیت، سمانتیت و یا مارتنزیت دگرگون شده جدا شده‌اند [27,28]. همان طور که مشاهده می‌شود، در نمونه‌های سنگ‌زنی شده به روش خنک‌کاری غیرمستقیم در مقایسه با روش حداقل میزان روان‌کار، ضخامت توده‌های باینایت کوچک‌تر و کسر سطحی آن‌ها بیشتر است و در نتیجه، میزان سختی بیشتر خواهد بود. این در حالی است که هر چه از لبه نمونه به سمت مرکز آن پیش می‌رویم، ضخامت توده‌های باینایت افزایش یافته و کسر سطحی آن‌ها نیز کاهش می‌یابد.

با بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی به دست آمده از نمونه‌های فولاد CK45 سنگ‌زنی شده به دو روش حداقل میزان روان‌کار و خنک‌کاری غیرمستقیم و مقایسه آن‌ها در روش‌های سنگ‌زنی با پارامترهای مشخص، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در ریزساختار سطح نهایی قطعات مشاهده می‌شود. ریزساختار نمونه‌های فولاد CK45 سنگ‌زنی شده شامل فریت و پرلیت ریز است. مطابق با تحول یوتکتوئید، آستنیت به ساختار لایه لایه پرلیت تبدیل می‌شود [29]. باید توجه داشت که فریت اولیه قبل از دمای دگرگونی یوتکتوئید تشکیل شده است. در روش خنک‌کاری غیرمستقیم در مقایسه با روش حداقل میزان روان‌کار، لایه‌های پرلیت ریزتر و در نتیجه میزان سختی و زبری سطح بیشتر خواهد بود. کسر سطحی فریت نسبت به کسر سطحی پرلیت به علت ثابت بودن مقدار کربن در همه نمونه‌های فولاد CK45 تغییر چندانی نشان نمی‌دهد. علاوه بر این، با فاصله گرفتن از لبه‌های نمونه و حرکت به سمت مرکز قطعه، لایه‌های پرلیت ریزتر می‌شوند که به میزان انتقال حرارت چرخ‌سنگ در طی فرآیند سنگ‌زنی مستقیما ارتباط دارد [30].



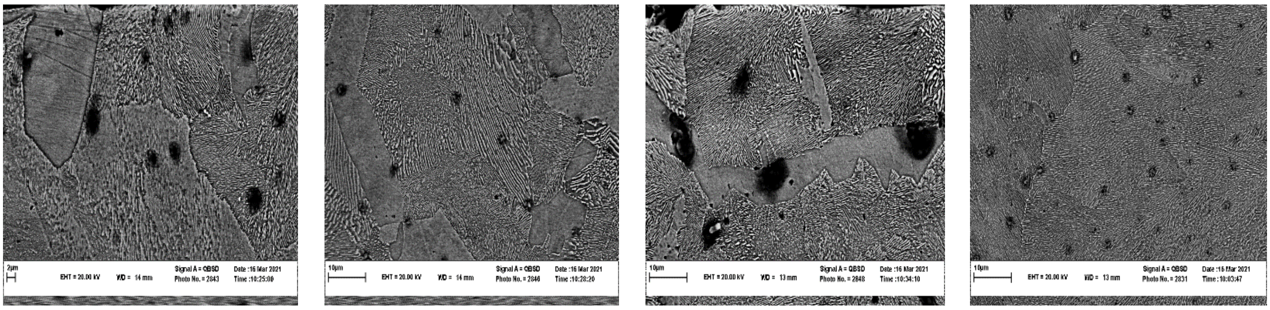
مرکز MQL لبه MQL مرکز ICG لبه ICG

(الف)



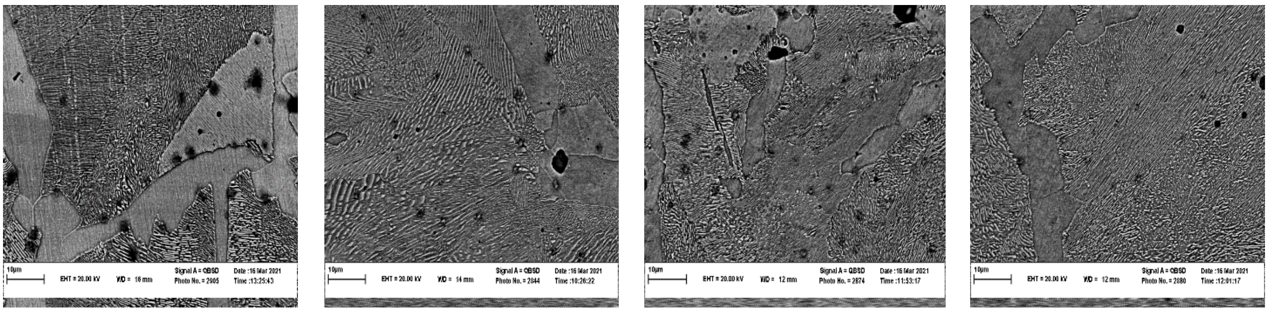
مرکز MQL لبه MQL مرکز ICG لبه ICG

(ب)



مرکز MQL لبه MQL مرکز ICG لبه ICG

(ج)



مرکز MQL لبه MQL مرکز ICG لبه ICG

(د)

شکل ۷ (الف) عمق برش ۰/۰۳ mm، (ب) عمق برش ۰/۰۲ mm، (ج) عمق برش ۰/۰۱ mm، (د) عمق برش ۰/۰۰۵ mm

افزایش عمق براده‌برداری سبب افزایش ضخامت لایه تغییرشکل پلاستیک ایجاد شده در مقابل ابزار چرخ‌سنگ می‌شود و در نتیجه، با افزایش مقدار انرژی گرمایی تولید شده، اختلاف دمای بیشتری برای دگرگونی یوتکتوئید تامین می‌گردد که سبب کاهش ضخامت لایه‌های پرلیت می‌گردد. این پدیده در نمونه‌هایی که به روش غیرمستقیم خنک شده‌اند، بیشتر مشهود

است. بنابراین، با افزایش عمق برش و کاهش ضخامت لایه‌های پرلیت، میزان سختی در قطعات سنگ‌زنی شده افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که در فولاد CK45 در مقایسه با فولاد M200، دگرگونی متفاوتی رخ داده است که احتمالا تحت تاثیر عناصر آلیاژی به ویژه کروم است [31,32]. البته، اختلاف زیاد ضریب هدایت حرارتی دو نوع فولاد مورد مطالعه که خود وابسته به میزان عناصر آلیاژی است نیز می‌تواند موثر باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از روش جدید خنک‌کاری برای بهبود میزان زبری و سختی سطوح فولادهای M200 و CK45 در فرآیند سنگ‌زنی تخت و با استفاده از چرخ‌سنگ اکسید آلومینیومی و با تغییر عمق سنگ‌زنی (از ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۳ mm) استفاده شده است و نتایج اصلی به دست آمده شامل موارد زیر است.

۱. نتایج به‌دست آمده از آزمون زبری‌سنجی برای فولادهای CK45 بیانگر کاهش میزان زبری‌سطح در روش خنک‌کاری غیرمستقیم نسبت به روش خنک‌کاری حداقل میزان روان‌کار بوده و کیفیت سطح همه نمونه‌های سنگ‌زنی شده به دلیل کاهش دمای مایع خنک کننده با روش خنک‌کاری غیرمستقیم بهبود یافته است.

۲. در نتایج به دست آمده مشخص است که اثر دبی در شرایط خنک‌کاری با روش غیرمستقیم در عمق برش‌های بالا با بهبود زبری سطح قابل مشاهده است. بدین ترتیب در عمق برش‌های پایین (کمتر از ۰/۰۳ mm) تفاوت محسوسی بین زبری‌های سطح حاصل شده در دبی‌های مختلف و دماهای ۱۰- و ۰ °C مشاهده نمی‌شود.

۳. در مطالعه اثر عمق براده‌برداری در فولادهای M200 و بر روی میزان زبری سطح، در هر دو روش بررسی شده با افزایش عمق براده‌برداری از عمق ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۳ mm، زبری سطح افزایش داشته است. این تغییرات به همراه این موضوع هستند که، در روش خنک‌کاری غیرمستقیم نسبت به روش خنک‌کاری حداقل میزان روان‌کار مقدار زبری سطح افزایش یافته است که دلیل آن می‌تواند تشکیل شدن فازهای سخت باینیت در فولاد M200 باشد.

۴. نتایج به‌دست آمده از آزمون سختی‌سنجی فولادهای M200 و CK45 نشان داد که میزان سختی در روش خنک‌کاری غیرمستقیم در مقایسه با روش خنک‌کاری حداقل میزان روان‌کار متفاوت است. دلیل این تفاوت مسیر خنک‌کاری قطعه کار در دو فولاد مورد مطالعه می‌باشد.

۵. نتایج به‌دست آمده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای فولادهای M200 و CK45 سنگ‌زنی شده به دو روش خنک‌کاری، ریزساختارهای کاملا متفاوت را نشان می‌دهند. در فولاد M200، ریزساختار شامل باینایت بالایی و باینایت پایینی است و این در حالی است که ریزساختار فولاد CK45، فریتی-پرلیتی است. اختلاف در ریزساختار می‌تواند به تفاوت در عناصر آلیاژی و در نتیجه، تغییر در ضریب هدایت حرارتی ارتباط پیدا کند. علاوه بر این، ارتباط مستقیمی بین ریزساختار ایجاد شده و میزان زبری و سختی سطوح سنگ‌زنی شده شناسایی شد.

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] A. Daneshi, “Microchip formation mechanism in grinding of Nickel-base superalloy Inconel 718”, Dissertation, *University of Freiburg, Faculty of Engineering*, pp. 10-55, 2019 .https://doi.org/10.6094/UNIFR/149624

[2] S. Malkin, and C. Guo, “Thermal analysis Grinding”, *CIRP Annals*, vol. 56, no. 2, pp. 760-782, 2007. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.005

[3] C. Heinzel, J. Solter, S. Jermolajev, B. Kolkwitz, and E. Brinksmeier, “A versatile method to determine thermal limits in grinding”, *Procedia CIRP*, vol. 13, pp. 131-136, 2014. https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.023

[4] D. C. Fricker, T. R. A. Pearce, and A. J. L. Harrison, “Predicting the occurrence of grind hardening in cubic boron nitride grinding of crankshaft steel”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of*

Engineering Manufacture, pp. 1339-1356, 2004. https://doi.org/10.1243/0954405042323577

[5] L. Judong, Y. Wei, H. Songwei, and X. Zhilong, "Experimental Study on Grinding-hardening of 1060 Steel", *Energy Procedia*, vol. 16, pp. 103-109, 2012. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.019

[6] H. Li, K. Gai, L. He, C. Zhang, H. Cui, and M. Li, "Non-isothermal phase-transformation kinetics model for evaluating the austenitization of 55CrMo steel based on Johnson–Mehl–Avrami equation", *Materials Design*, vol. 92, pp.731-741, 2016. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.110

[7] L. Ling, L. Luo, and F. Liu, "Effects of grinding treatment on surface properties and deformation microstructure in alloy 304L", *Surface and Coatings Technology*, vol. 408, pp. 126850, 2021. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126850

[8] D. C. Fricker, T. R. A. Pearce, and J. L. Harrison, "Predicting the occurrence of grind-hardening in cubic boron nitride grinding of crankshaft steel", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 218, no.10, pp.1339-1356, 2004. https://doi.org/10.1243/0954405042323577

[9] K. Salonitis, T. Chrondros, and G. Chryssolouris, "Grinding wheel effect on grind-hardening process", International *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 38, no. 1, pp.48-58, 2008. https://doi.org/10.1007/s00170-007-1078-9

[10] U. Alonso, N. Ortega, J.A. Sanchez, I. Pombo, B. Izquierdo, and S. Plaza, "Hardness control of grind-hardening and finishing grinding by means of area-based specific energy", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 88, pp. 24-33, 2015. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.09.001

[11] G. Manimaran, and M. Pradeepkumar, "Influence of Cryogenic Cooling on the Surface Grinding of Stainless Steel 316", *Cryogenics*, vol. 59, pp. 76-83, 2014. https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2013.11.005

[12] A. Rezaei, S. H. Kheyrandish and A. O. Esfahani, "Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of micro alloyed medium carbon steel", International journal of industrial engineering and production management, vol. 16, no. 3, pp.125-132, 2005 (In Persian).

[13] Z. Ding, G. Sun, M. Guo, X. Jiang, B. Li, and S. Y. Liang, "Effect of phase transition on micro-grinding-induced residual stress", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 281, pp. 116647, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116647

[14] S. Zhang, B. Hallstedt, C. Broeckmann, S. Barth, D. Trauth, and T. Bergs, "Numerical prediction of the microstructure and stress evolution during surface grinding of AISI 52100 (din 100cr6)", *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, vol. 7, pp. 2020213, 2018. https://doi.org/10.1007/s40192-018-0122-y

[15] C. Sharma, S. Ghosh and P. Talukda, "Finite Element Analysis of Workpiece Temperature during Surface Grinding of Inconel 718 Alloy", *5th International & 26th, All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014)*, IIT Guwahati, Assam, India, pp.420-420, 2014.

[16] Y. Hamedi, A. R. Kiani-Rashid, H. R. Shishegar, and H. R. Azaat-Pour, "The influence of different heat treatment cycles on controlled surface graphitization in CK45 steel", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 492, no. 1-2, pp. 739-744, 2010. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.12.036

[17] Z. H. Xie, R. J. Moona, M. Hoffmana, P. Munroea, and Y. B. Cheng, "Role of microstructure in the grinding and

polishing of α-sialon ceramics”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 23, no. 13, pp. 2351-2360, 2003. https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00046-3

[18] A. B. Chattopadhyay, A. Bose, and A. K. Chattopdhyay, “Improvements in Grinding Steels by Cryogenic Cooling”, *Precision Engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 93-98, 1985. https://doi.org/10.1016/0141-6359(85)90098-4

[19] G. Manimaran, and M. Pradeep kumar, “Influence of Cryogenic Cooling on the Surface Grinding of Stainless Steel 316”, *Cryogenics*, vol. 59, pp. 76-83, 2014. https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2013.11.005

[20] G. Manimaran, and M. Pradeep kumar, “Effect of Cryogenic Cooling and Sol-Gel Alumina Wheel on Grinding Performance of AISI 316 Stainless Steel”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 304-312, 2013. https://doi.org/10.1016/j.acme.2013.03.002

[21] W. Stachurski, J. Sawicki, B. Januszewicz, and R. Rosik, “The Influence of the Depth of Grinding on the Condition of the Surface Layer of 20MnCr5 Steel Ground with the Minimum Quantity Lubrication (MQL) Method,” *materials*, vol. 15, no. 4, pp. 1336-1344, 2022. https://doi.org/10.3390/ma15041336

[22] G. C. Wang, J. Chen, G. Y. Xu, and X. Li, “Influence of Cooling Condition on the Performance of Grinding Hardened Layer in Grind-hardening”, *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2018. https://doi.org/10.1088/1757-899X/307/1/012080

[23] J. R. Miller, M. J. LaLama, R. L. Kusnic, D. E. Wilson, P. M. Kiraly, S. W. Dickson, and M. Zeller, “On the nature of calcium magnesium acetate road deicer”, *Journal of Solid State Chemistry*, vol. 270, pp. 1-10, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jssc.2018.10.041

[24] K. Salonitis, and A. Kolios, “Experimental and numerical study of grind-hardening-induced residual stresses on AISI 1045 Steel”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol 79, pp. 1443-1452, 2015. https://doi.org/10.1007/s00170-015-6912-x

[25] A. Heydari, M. Pour, and M. R. Gharib, “Improvement of steel alloys using indirect cooling grinding (I.C.G.)”, *Heliyon*, vol. 9, no. 12, pp. 1-16, 2023. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22738

[26] A. Saberi, A. R. Rahimi, H. Parsa, M. Ashrafijou, and F. Rabiei, “Improvement of surface grinding process performance of CK45 soft steel by minimum quantity lubrication (MQL) technique using compressed cold air jet from vortex tube”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 131, pp. 728-738, 2016. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.104

[27] Z. G. Yang, and H. S. Fang, “An overview on bainite formation in steels”, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 9, no. 6, p. 277-286, 2005. https://doi.org/10.1016/j.cossms.2006.06.005

[28] O. Seppala, A. Pohjonen, J. Mendonça, V. Javaheri, R. Podor, H. Singh, and J. Larkiola, “In-situ SEM characterization and numerical modelling of bainite formation and impingement of a medium- carbon, low-alloy steel”, *Materials and Design*, vol. 230, pp. 111956, 2023. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111956

[29] S. E. Offerman, L. J. G. W. van Wilderen, N. H. van Dijk, M.Th. Rekveldt, J. Sietsma, and S. van der Zwaag, “Cluster formation of pearlite colonies during the austenite/pearlite phase transformation in eutectoid steel”, *Physica B: Condensed Matter*, vol. 335, no. 1-4, pp. 99-103, 2003. https://doi.org/10.1016/S0921-4526(03)00216-3

[30] T. Tawakoli, M. J. Hadad, and M. H. Sadeghi, “Investigation on minimum quantity lubricant-MQL grinding of

100Cr6 hardened steel using different abrasive and coolant-lubricant types", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 50, no. 8, pp. 698-708, 2010. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.04.009

[31] M. Shah, S. K. Das, and S. G. Chowdhury, "Effect of Alloying Elements on Microstructure and Mechanical Properties of Air-Cooled Bainitic Steel", *Metallurgy and Materials Transaction A*, vol. 50, pp. 2092-2102, 2019. https://doi.org/10.1007/s11661-019-05177-1

[32] C. Hofer, H. Leitner, F. Winkelhofer, H. Clemens, and S. Primig, "Structural characterization of "carbide-free" bainite in a Fe-0.2C-1.5Si-2.5Mn steel", *Materials Characterization*, vol. 102, pp. 85-91, 2015. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.02.020